



# 中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1495—2014

---

## 矢量网络分析仪校准规范

Calibration Specification for Vector Network Analyzers



2014-11-17 发布

2015-02-17 实施

---

国家质量监督检验检疫总局 发布

# 矢量网络分析仪校准规范

Calibration Specification for

Vector Network Analyzers

JJF 1495—2014

归口单位：全国无线电计量技术委员会

起草单位：中国计量科学研究院

中国工程物理研究院计量测试中心

本规范委托全国无线电计量技术委员会负责解释

**本规范主要起草人：**

刘欣萌（中国计量科学研究院）

黄 辉（中国计量科学研究院）

魏 竹（中国工程物理研究院计量测试中心）

**参加起草人：**

张翠翠（中国工程物理研究院计量测试中心）

王 益（中国工程物理研究院计量测试中心）



## 目 录

引言 .....	( III )
1 范围 .....	( 1 )
2 引用文件 .....	( 1 )
3 术语和计量单位 .....	( 1 )
3.1 外差式网络分析仪 .....	( 1 )
3.2 测试端口 .....	( 1 )
3.3 测试端口间串扰 .....	( 1 )
3.4 测试端口本底噪声 .....	( 1 )
3.5 扫迹噪声 .....	( 1 )
3.6 动态准确度 .....	( 1 )
3.7 校准件 .....	( 1 )
3.8 检验件 .....	( 1 )
4 概述 .....	( 2 )
4.1 用途 .....	( 2 )
4.2 原理和结构 .....	( 2 )
5 计量特性 .....	( 2 )
5.1 内部信号源频率范围 .....	( 2 )
5.2 内部信号源功率范围 .....	( 2 )
5.3 扫迹噪声范围 .....	( 2 )
5.4 本底噪声范围 .....	( 2 )
5.5 串扰范围 .....	( 2 )
5.6 模值动态准确度范围 .....	( 2 )
5.7 校准件特性范围 .....	( 2 )
5.8 散射参数测量范围 .....	( 3 )
6 校准条件 .....	( 3 )
6.1 环境条件 .....	( 3 )
6.2 测量标准及其他设备 .....	( 3 )
7 校准项目和校准方法 .....	( 4 )
7.1 校准项目一览表 .....	( 4 )
7.2 外观及工作正常性检查 .....	( 5 )
7.3 内部信号源频率 .....	( 5 )
7.4 内部信号源功率 .....	( 6 )
7.5 扫迹噪声 .....	( 7 )
7.6 本底噪声 .....	( 7 )
7.7 串扰 .....	( 8 )

---

7.8 模值动态准确度·····	( 9 )
7.9 校准件特性·····	(12)
7.10 散射参数测量准确度 ·····	(12)
8 校准结果的表达·····	(14)
9 复校时间间隔·····	(14)
附录 A 校准记录格式 ·····	(15)
附录 B 校准证书内页格式 ·····	(22)
附录 C 主要项目测量不确定度评定 ·····	(26)



## 引 言

本规范依据 JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》和 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》编制。

本规范主要针对频率范围为 9 kHz~50 GHz 的外差式矢量网络分析仪的校准方法进行了规定，校准项目包括：内部信号源频率、内部信号源功率、扫迹噪声、本底噪声、串扰、模值动态准确度、校准件特性、散射参数测量准确度等。并在附录中给出了扫迹噪声、本底噪声、模值动态准确度等主要校准项目的测量不确定度评定实例。

本规范为首次发布。



# 矢量网络分析仪校准规范

## 1 范围

本规范适用于外差式矢量网络分析仪及使用扩展模块扩展了测量频率范围或测试端口数量的外差式矢量网络分析仪的校准。

## 2 引用文件

本规范引用下列文件：

IEEE Standard 287 精密同轴连接器标准（DC~110 GHz） [Standard for Precision Coaxial Connectors（DC to 110 GHz）]

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本使用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

## 3 术语和计量单位

### 3.1 外差式网络分析仪 heterodyne network analyzer

使用外差式或超外差式接收机的网络分析仪。

### 3.2 测试端口 test port

矢量网络分析仪面板上用来与被测网络连接，输出和输入测试信号的端口。

### 3.3 测试端口间串扰 test port cross talk

用来描述不通过测试端口之间的连接路径，测试信号从一个测试端口泄漏到另一个测试端口的程度，常用单位是分贝（dB），简称串扰。

### 3.4 测试端口本底噪声 test port noise floor

用来描述等效到网络分析仪测试端口的输入噪声功率，常用单位是 dBm，简称本底噪声。

### 3.5 扫迹噪声 trace noise

用来描述在输入测试端口的测试信号较大，可忽略本底噪声的影响时，散射参数示值（模值和相角）随时间的起伏。

注：扫迹噪声包括模值扫迹噪声和相位扫迹噪声，模值扫迹噪声常用单位是分贝（dB），相位扫迹噪声常用单位是度（°）。

### 3.6 动态准确度 dynamic accuracy

用来描述网络分析仪测量测试端口入射功率时，其测量准确度依赖于被测信号（频率、功率）的程度，常用单位是分贝（dB）。

### 3.7 校准件 calibration kit

用于矢量网络分析仪系统误差自校准的一组标准器，自校准方法不同，标准器的组成也随之不同。

### 3.8 检验件 verification kit

用于检验矢量网络分析仪自校准后测量能力的一组标准器。

本规范中的术语定义只适用于本规范。没有特别注明的话，本规范中所使用的术语和定义均是相对于测试端口定义的。

## 4 概述

### 4.1 用途

矢量网络分析仪是主要用于进行微波器件网络参数测量的一种仪器，可直接以扫频的方式测量单端口和多端口器件的复数散射参数，并可以换算成其他网络参数，如电压驻波比、阻抗、相移和群时延等。

### 4.2 原理和结构

矢量网络分析仪通常由信号源单元、信号分离单元、接收机单元、数字控制及显示部分组成，一般采用测量复数入射电压与复数出射电压比的方法，计算散射参数。仪器由内嵌式计算机控制，对被测参数进行系统误差的修正和转换。

矢量网络分析仪主要用于测量电信号传播路径或电子元器件的散射参数。还可用于测量阻抗的模 ( $|Z|$ )、相位角 ( $\theta$ ) 等参数。

矢量网络分析仪一般有两个测试端口，也有单端口、三端口或更多端口的形式。测试端口一般为同轴金属接头，随测量频率范围的不同，有精密 7 mm、N 型、3.5 mm、2.92 mm、2.4 mm 和 1.85 mm 等型式，具体型式可参见 IEEE Standard 287。

## 5 计量特性

### 5.1 内部信号源频率范围

9 kHz~50 GHz。

### 5.2 内部信号源功率范围

-110 dBm~20 dBm。

### 5.3 扫迹噪声范围

模值 (0~0.1) dB，相位 (0~1)°。

注：由于扫迹噪声与矢量网络分析仪的接收机中频带宽有关，也与接收到的测试信号功率有关，这里的测量范围是在中频带宽为 1 kHz，接收到的测试信号功率为 -15 dBm 时给出的。

### 5.4 本底噪声范围

(-140~-60) dBm。

注：由于本底噪声与矢量网络分析仪的接收机中频带宽有关，不同中频带宽下的本底噪声测量范围不同，这里的测量范围是在中频带宽为 10 Hz 时给出的。

### 5.5 串扰范围

(-150~-70) dB。

### 5.6 模值动态准确度范围

在 (-70~10) dBm 的动态范围内，模值动态准确度 (0~1) dB。

### 5.7 校准件特性范围

开路器：反射系数模值不大于 1，相角 -180°~180°；

短路器：反射系数模值不大于 1，相角  $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$ ；

固定负载：反射系数模值不大于 0.1，相角  $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 。

## 5.8 散射参数测量范围

$S_{ii}$  模值  $0\sim 1$ ，相角  $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$ ； $S_{ij}$  模值  $0\text{ dB}\sim 70\text{ dB}$ ，相角  $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 。

注： $S_{ij}$  为矢量网络分析仪测量得到的散射参数矩阵  $[S]$  中的元素， $i, j$  指散射参数的下标，几端口可测得几维  $[S]$ 。散射参数测量不确定度一般按模值和相角分别考虑，并用绝对测量不确定度形式表示。由于矢量网络分析仪的测量范围很大，测量设置较复杂，常以图表或公式的形式列出对应测量设置和测量范围的散射参数测量不确定度。

以上指标不是用于合格性判别，仅供参考。

## 6 校准条件

### 6.1 环境条件

6.1.1 环境温度： $(23\pm 3)^{\circ}\text{C}$ ，且校准和测量过程中温度起伏不超过  $1^{\circ}\text{C}$ 。

6.1.2 相对湿度： $(60\pm 20)\%$ 。

6.1.3 电源电压及频率： $(220\pm 11)\text{V}$ ， $(50\pm 1)\text{Hz}$ 。

6.1.4 其他：周围无影响校准工作正常进行的电磁干扰及机械振动。

### 6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 校准所选用的设备详见表 1。

表 1 校准用主要设备及配套设备

序号	名称	主要技术指标	备注
1	功率计	功率测量范围： $(-60\sim 20)\text{dBm}$ 测量不确定度：优于 $0.2\text{ dB}$ 线性度：优于 $0.02\text{ dB}$ ( $-50\text{ dBm}\sim -20\text{ dBm}$ )	校准用主要设备的技术指标可根据被校矢量网络分析仪的具体技术指标或被校矢量网络分析仪的具体被校准指标范围进行调整
2	频率计	频率分辨力：优于 $1\text{ Hz}$ 测量不确定度：优于 $1\text{ Hz}+1\times 10^{-7}\times f\text{ (Hz)}$	
3	校准件	含开路、短路、固定负载和精密转接头 开路器相角不确定度：优于 $3^{\circ}$ 短路器相角不确定度：优于 $3^{\circ}$ 负载反射系数不确定度：优于 $0.01$ 精密转接头符合 IEEE Standard 287 中 LPC 接头指标	
4	检验件 (含失配负载和衰减器)	失配负载 标称电压驻波比 (VSWR)：2.00 反射系数模值不确定度：优于 $0.01$ 反射系数相角不确定度：优于 $3^{\circ}$ 衰减器 标称衰减量：20 dB 两端口电压驻波比 (VSWR)：优于 1.5 传输系数模值不确定度：优于 $0.05\text{ dB}$ 传输系数相角不确定度：优于 $1^{\circ}$	

表 1 (续)

序号	名称	主要技术指标	备注	
5	步进衰减器	衰减范围：(0~70) dB，步进 1 dB 两端口电压驻波比 (VSWR)：优于 1.5 衰减不确定度：优于 0.006 dB+0.000 4×衰减值	校准用主要设备的技术指标可根据被校矢量网络分析仪的具体技术指标或被校矢量网络分析仪的具体被校准指标范围进行调整	
6	线性测量装置	功率输出范围：(-20~10) dBm，步进 1 dB 两端口电压驻波比 (VSWR)：优于 1.5 衰减不确定度：优于 0.02 dB		
7	矢量网络分析仪	测试端口本底噪声 (IFBW=100 Hz)：优于 -90 dBm 测试端口扫迹噪声 (IFBW=100 Hz)：优于 0.004 dB 自校准修正后：方向性、源匹配和负载匹配优于 40 dB， 传输扫迹优于 0.01 dB		
8	柔性测试电缆	长度：1 m 以上 两端口电压驻波比 (VSWR)：优于 1.6 电缆幅度稳定性：优于 0.15 dB 电缆相位稳定性：优于 $(0.08 \times f + 0.8)^\circ$		
9	插针深度量规	最佳分辨力：2.54 $\mu\text{m}$ 测量不确定度：优于 4 $\mu\text{m}$		
10	力矩扳手	技术指标参见 IEEE Standard 287		
注：				
1 校准用设备的频率范围和接头型式应与被校矢量网络分析仪相适应，如需转接，则应保证转接后的技术指标仍满足表 1。				
2 电缆稳定性指电缆以 10 cm 弯折半径弯折 90°然后拉直，重复 3 次以后电缆的 $S_{21}$ 模值和相角的变化。 $f$ 为以 GHz 为单位的测试频率。				
3 同轴接头连接时应正确使用相应的力矩扳手以保证连接的有效和可靠。				
4 线性测量装置是一种放大器、两电阻功分器和步进衰减器组合。				
5 主要技术指标中的不确定度的包含因子 $k=2$ 。				

6.2.2 校准用设备均应具备检定证书或校准报告。

## 7 校准项目和校准方法

### 7.1 校准项目一览表

校准项目见表 2。

表 2 校准项目一览表

校准项目名称	类型
外观及工作正常性检查	功能检查
内部信号源频率	信号源部分量值校准

表 2 (续)

校准项目名称	类型
内部信号源功率	信号源部分量值校准
扫迹噪声	接收机部分量值校准
本底噪声	接收机部分量值校准
串扰	接收机部分量值校准
模值动态准确度	接收机部分量值校准
校准件特性	校准件量值校准
散射参数测量准确度	总体量值校准

## 7.2 外观及工作正常性检查

### 7.2.1 外观检查

#### 7.2.1.1 被校矢量网络分析仪外观检查

被校矢量网络分析仪应结构完整, 无影响正常工作的机械损伤。电源电压选择开关设置电压与所用电源电压一致。仪器各按键工作应保持正常。被校矢量网络分析仪的测试端口应无明显松动, 内外表面均应无明显损伤, 端口表面和内部需保持清洁。同轴型式的测试端口需测量其插针深度, 重复测量次数应在 3 次以上, 取重复测量结果的中位数作为最终校准结果, 校准记录格式参见附录 A 表 1.1。

#### 7.2.1.2 被校校准件检查

被校矢量网络分析仪配合使用的校准件(固定负载、短路器和开路器等)如需校准, 其端口表面和内部应无明显损伤, 被校校准件的端口表面和内部需保持清洁。

需对同轴型式被校校准件测量其插针深度, 取重复测量结果的中位数作为最终校准结果, 校准记录格式参见附录 A 表 1.2, 重复测量次数应在 3 次以上。

### 7.2.2 被校矢量网络分析仪工作正常性

通电后被校矢量网络分析仪能进入正常工作状态。有自检功能的被校矢量网络分析仪, 应能通过自检。在被校矢量网络分析仪的测试端口连接失配负载或测试电缆作为被测对象, 显示合适的图形, 检查被校矢量网络分析仪的基本测量设置、数据处理和显示功能是否正常。

## 7.3 内部信号源频率

7.3.1 这项校准旨在校准被校矢量网络分析仪内部信号源在测试端口输出信号的频率。如图 1 所示, 用电缆连接被校矢量网络分析仪的测试端口和频率计的输入端。

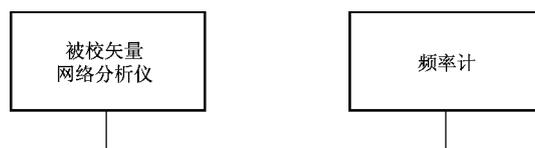


图 1 内部信号源频率校准连接框图

7.3.2 设置被校矢量网络分析仪工作在连续波输出模式, 按被校矢量网络分析仪说明

书要求或实际需要选取测试信号频率点，应包括被校矢量网络分析仪测量范围的下限频率和上限频率。

7.3.3 用频率计测量被校矢量网络分析仪的测试信号频率，重复测量多次后取测量结果平均值  $F_s$ ，测试信号频率误差按公式（1）计算，校准记录格式参见附录 A 表 2，重复测量次数应在 3 次以上。

$$\delta_F = F - F_s \quad (1)$$

式中：

$\delta_F$  ——内部信号源频率的示值误差，Hz；

$F$  ——被校矢量网络分析仪的内部信号源频率标称值，Hz；

$F_s$  ——被校矢量网络分析仪的内部信号源频率校准值，Hz。

注：

- 1 应考虑连接电缆的损耗对频率计输入的测试信号功率的影响，以保证频率计能正常测出测试信号的频率；
- 2 如被校矢量网络分析仪带有高稳时基选件，应确认选件正常起作用；
- 3 如无法设置在连续波输出模式，可以将被校矢量网络分析仪频率扫描的开始频率设置为校准频率，并适当增加扫描时间，使频率计有足够长时间完成测量。

#### 7.4 内部信号源功率

7.4.1 这项校准旨在校准被校矢量网络分析仪内部信号源在测试端口输出信号的功率，被校矢量网络分析仪和功率计连接框图如图 2 所示。



图 2 内部信号源功率校准连接框图

7.4.2 设置被校矢量网络分析仪工作在连续波输出模式，按被校矢量网络分析仪说明书要求或实际需要设置网络分析仪内部信号源的频率和功率。

7.4.3 正确使用功率计测量被校矢量网络分析仪的实际测试信号功率，记录功率计的读数，重复测量多次后取测量结果中位数值  $P_s$ ，按公式（2）计算测试信号功率误差，校准记录格式参见附录 A 表 3，重复测量次数应在 3 次以上。

$$\delta_P = P - P_s \quad (2)$$

式中：

$\delta_P$  ——内部信号源功率的示值误差，dBm；

$P$  ——被校矢量网络分析仪的内部信号源功率标称值，dBm；

$P_s$  ——被校矢量网络分析仪的内部信号源功率校准值，dBm。

注：

- 1 对测试端口在 1 个以上的被校矢量网络分析仪，应分别测量每个端口的输出功率。
- 2 在将功率计连接到被校矢量网络分析仪测试端口时，如需使用转接头或连接电缆，则应预先测量它们的散射参数，并据此对功率测量结果进行修正。
- 3 对于在（-60~20）dBm 范围内的测试信号可使用功率计进行校准，对于在 -60 dBm 以下

的信号源功率，需使用测量接收机或频谱仪等能测量微小功率的测量仪器进行校准。测量设置参照上述步骤和测量仪器的使用说明书。

- 4 如无法设置在连续波输出模式，可以将被校矢量网络分析仪频率扫描的开始频率设置为被测频率，并适当增加扫描时间，使功率计有足够长时间完成测量。

## 7.5 扫迹噪声

7.5.1 这项校准旨在测量被校矢量网络分析仪在一定测量设置下的扫迹噪声，校准连接框图如图 3 所示，被校的测试端口端接短路器。

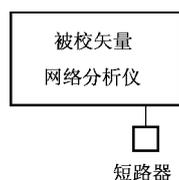


图 3 扫迹噪声校准连接框图

7.5.2 将被校矢量网络分析仪测试信号设置在连续波输出状态，测试信号频率和功率、接收机中频带宽和平均等设置参数按仪器技术指标或实际测量要求设置，测量点数至少为 51 个点。

7.5.3 将测量功能设置为测量反射系数模值，并以线性形式显示。在单次扫描后，统计所有测量点反射系数模值的单次标准差和算术平均值。重复测量 3 次以上，取重复测量结果的中位数作为最终测量结果，校准记录格式参见附录 A 表 4。

7.5.4 按公式 (3) 计算模值扫迹噪声测量结果。

$$TN_M = 20 \times \lg(1 + \text{stdev}M/\text{avg}M) \quad (3)$$

式中：

$TN_M$  ——模值扫迹噪声测量结果，dB；

$\text{stdev}M$  ——所有测量点反射系数模值的单次标准差；

$\text{avg}M$  ——所有测量点反射系数模值的算术平均值。

7.5.5 将测量功能设置为测量反射系数相角，单位 ( $^{\circ}$ )。在单次扫描后，统计所有测量点反射系数相角的单次标准差  $\text{stdev}P$ ，重复测量 3 次以上，取重复测量结果的中位数作为相位扫迹噪声测量结果  $TN_P$ ，校准记录格式参见附录 A 表 4。

注：对于测试端口在 1 个以上的被校矢量网络分析仪，应分别校准每个端口的扫迹噪声。

## 7.6 本底噪声

7.6.1 这项校准旨在测量被校矢量网络分析仪等效的测试端口输入的噪声功率。

7.6.2 将被校矢量网络分析仪测试信号设置在连续波输出状态，测试信号频率和接收机中频带宽和平均按仪器技术指标或实际测量要求设置，将测试信号功率设置为  $-20$  dBm，测量点数至少为 51 个点。

7.6.3 设置被校矢量网络分析仪显示  $S_{21}$  的实部。在被校矢量网络分析仪测试端口 1 上连接测试电缆，然后用功率计测量测试电缆另一端输出功率，测量结果记为  $P_S$ ，校准连接框图如图 4 左侧部分所示。

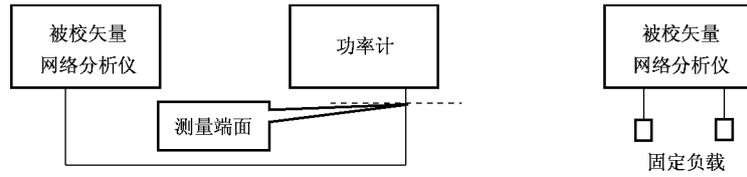


图 4 本底噪声校准连接框图

7.6.4 将测试电缆的另一端连接到被校矢量网络分析仪测试端口 2，然后对被校矢量网络分析仪做从测试端口 1 到测试端口 2 的直通校准。

7.6.5 校准完成后，取下测试电缆，在两个测试端口上连接固定负载，测量连接如图 4 右侧部分所示。在单次扫描后，对测量结果求单次标准差。按公式 (4) 计算测试端口 2 本底噪声。

$$N = 20 \times \lg(\text{stdev}N) + P_s \quad (4)$$

式中：

$N$  ——本底噪声最终测量结果，dBm；

$\text{stdev}N$  ——单次扫描后，测量结果的单次标准差；

$P_s$  ——功率计测量结果，dBm。

7.6.6 根据以上步骤重复测量本底噪声，重复次数应在 3 次以上，取重复测量结果的中位数作为本底噪声最终测量结果，校准记录格式参见附录 A 表 5。

注：

- 1 对于测试端口在 1 个以上的被校矢量网络分析仪，应参照以上步骤分别测量每个端口的本底噪声。
- 2 测试信号功率设置为  $-20$  dBm 是为使散射参数测量信噪较高，非线性较小，串扰对本底噪声影响较小且使功率计测量不确定度较小。因此，如果受网络分析仪指标限制，无法设置为  $-20$  dBm 时，则需选取适当其他适当的功率值进行设置。

## 7.7 串扰

7.7.1 这项校准旨在测量在被校矢量网络分析仪测试端口间的串扰。

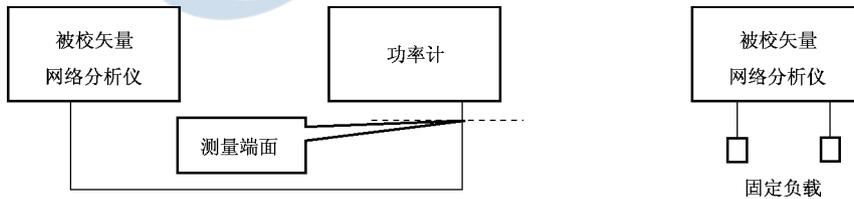


图 5 串扰校准连接框图

7.7.2 将被校矢量网络分析仪测试信号设置在连续波输出状态，按仪器技术指标或实际测量要求设置测试信号频率，对接收机中频带宽根据仪器技术指标设置或设置为 10 Hz，测量点数设置为至少 11 个点。将测试信号功率设置为比网络分析仪标称最大稳幅功率输出值小 1 dB，设置被校矢量网络分析仪显示  $S_{21}$  的线性模值。

7.7.3 在被校矢量网络分析仪测试端口 1 上连接功率计，测量测试端口 1 的输出功率，测量结果记为  $P_1$ 。然后在被校矢量网络分析仪测试端口 1 上连接测试电缆，用功率计测量测试电缆另一端输出功率，测量结果记为  $P'_1$ ，校准连接如图 5 左侧部分所示。

7.7.4 将测试电缆的另一端连接到被校矢量网络分析仪测试端口 2，然后对被校矢量网络分析仪做从测试端口 1 到测试端口 2 的直通校准。

7.7.5 校准完成后，取下测试电缆，在两个测试端口上连接固定负载，测量连接如图 5 右侧部分所示。设置扫描平均次数为 100 以上，开启扫描平均，待平均完成后对测量值求算术平均值  $M_A$ 。按公式 (5) 计算测试端口 1 到测试端口 2 的串扰。

$$C_t = 20 \times \lg(M_A) + (P'_1 - P_1) \quad (5)$$

式中：

$C_t$  ——测试端口 1 到测试端口 2 的串扰测量值，dB；

$M_A$  ——矢量网络分析仪  $S_{21}$  的线性模值测量值的算术平均值；

$P'_1$  ——矢量网络分析仪测试端口接测试电缆后，功率计测量值，dBm；

$P_1$  ——矢量网络分析仪测试端口的功率计测量值，dBm。

7.7.6 根据以上步骤重复测量串扰，重复次数应在 3 次以上，取重复测量值的中位数作为串扰最终测量值，校准记录格式参见附录 A 表 6。

7.7.7 以上步骤测得端口 1 到端口 2 的串扰，如想测端口 2 到端口 1 的串扰，则需设置端口 2 为信号输出端，端口 1 为信号接收端，并参照以上步骤进行测量。

注：对于 2 个测试端口以上的被校矢量网络分析仪，应分别测量两两测试端口间的串扰。

## 7.8 模值动态准确度

### 7.8.1 用步进衰减器校准模值动态准确度

7.8.1.1 测量测试端口入射的信号功率小于测试端口最大输出功率时的模值动态准确度，可以用步进衰减器校准其模值动态准确度。

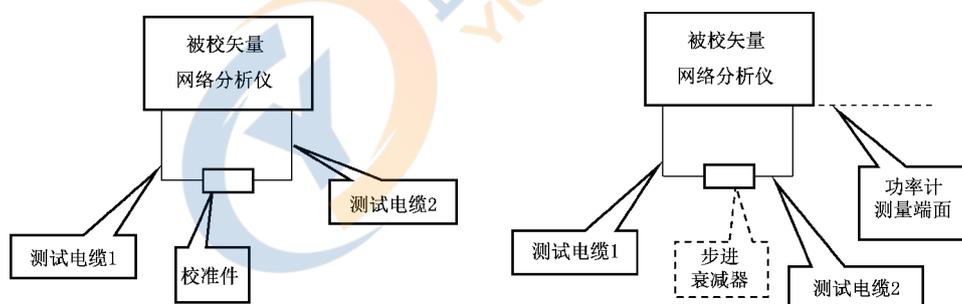


图 6 用步进衰减器校准模值动态准确度校准连接框图

7.8.1.2 如图 6 左所示连接，被校矢量网络分析仪测试信号设置在连续波输出状态，按仪器技术指标或实际测量要求设置测试信号频率，信号功率设置为  $-10$  dBm 或根据仪器技术指标设置。将接收机中频带宽设置为  $10$  Hz 或根据仪器技术指标设置，测量点数至少为 11 个点。

7.8.1.3 在测试端口分别连接柔性测试电缆 1 和测试电缆 2，用校准件对被校矢量网络分析仪进行带隔离校准的完全两端口自校准。

7.8.1.4 测试信号功率设置为比网络分析仪标称最大稳幅功率输出值小  $1$  dB 或实际测量要求设置。被校矢量网络分析仪以线性形式显示  $S_{21}$ ，扫描平均次数 100 以上，开启扫描平均，待平均完成后取算术平均值。

7.8.1.5 如图 6 右所示，在自校准参考面连接步进衰减器。将连接在测试端口 2 的测

试电缆 2 的一端取下后连接功率计，调节步进衰减器的衰减量，使功率计读数最接近  $-20$  dBm 或其他参考功率值，记录功率计读数  $P_{2r}$ 、步进衰减器衰减值  $A_r$  以及相应  $S_{21}$  的模值算术平均值  $M_r$ ，此时的模值准确度按公式 (6) 计算：

$$DA_{2r} = 20 \times \lg(M_r) + A_r \quad (6)$$

式中：

- $DA_{2r}$ ——功率计读数最接近  $-20$  dBm 或其他参考功率值时，模值准确度，dB；  
 $M_r$ ——功率计读数最接近  $-20$  dBm 或其他参考功率值时， $S_{21}$  模值算术平均值；  
 $A_r$ ——功率计读数最接近  $-20$  dBm 或其他参考功率值时，步进衰减器衰减值，dB。

7.8.1.6 将测试电缆 2 连接功率计的一端取下后，连接矢量网络分析仪的测试端口 2。步进衰减器从  $0$  dB 开始，以  $1$  dB 或根据仪器技术指标要求增加步进衰减器的衰减值，并读取步进后的相应  $S_{21}$  模值算术平均值。设步进衰减器第  $i$  次步进后的衰减值  $A_i$ ，相应  $S_{21}$  的模值算术平均值  $M_i$ ，由公式 (7) 计算端口 2 入射功率  $P_{2i}$ ：

$$P_{2i} = (P_{2r} + A_r - A_i) \quad (7)$$

式中：

- $P_{2i}$ ——步进衰减器第  $i$  次步进时，测试端口 2 的入射功率，dBm；  
 $P_{2r}$ ——功率计读数最接近  $-20$  dBm 或其他参考功率值时功率计示值，dBm；  
 $A_r$ ——与  $P_{2r}$  示值对应的步进衰减器衰减值，dB；  
 $A_i$ ——步进衰减器第  $i$  次步进时，步进衰减器的衰减值，dB。

端口 2 在功率为  $P_{2i}$  时的模值动态准确度  $DA_{2i}$  (dB) 按公式 (8) 计算：

$$DA_{2i} = 20 \times \lg(M_i) + A_i \quad (8)$$

式中：

- $DA_{2i}$ ——步进衰减器第  $i$  次步进时，模值准确度，dB；  
 $M_i$ ——步进衰减器第  $i$  次步进时， $S_{21}$  模值算术平均值；  
 $A_i$ ——步进衰减器第  $i$  次步进时，步进衰减器衰减值，dB。

7.8.1.7 根据以上步骤重复测量模值动态准确度，重复次数应在 3 次以上，取重复测量值的中位数作为模值动态准确度最终测量值，校准记录格式参见附录 A 表 7。

7.8.1.8 同理可以测量得到测试端口 1 或其他测试端口的模值动态准确度。

#### 7.8.2 用线性测量装置校准模值动态准确度

如果需要在超过测试端口最大输出功率的范围校准矢量网络分析仪的模值动态准确度，则应使用内置有放大器的线性测量装置，线性测量装置一般采用如图 7 所示的结构。

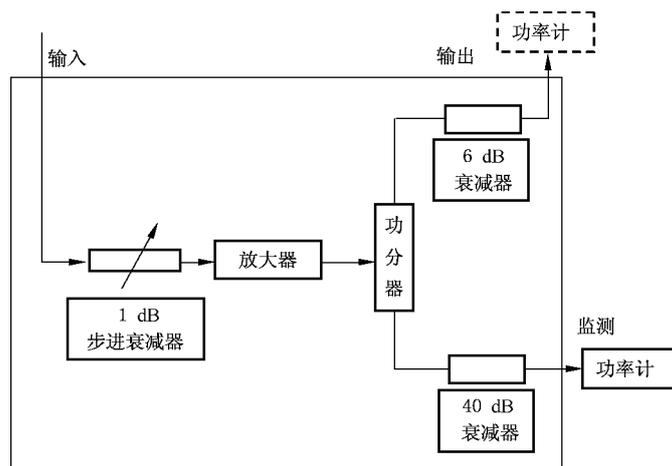


图 7 线性测量装置结构示意图

7.8.2.1 校准连接框图如图 8 所示。将线性测量装置的输入端和输出端分别连接到测试电缆 1 和测试电缆 2，再将功率计连接到测试电缆 2 的输出端。将被校矢量网络分析仪测试信号设置在连续波输出状态，按仪器技术指标或实际测量要求设置测试信号频率，将接收机中频带宽设置为 10 Hz 或根据仪器技术指标设置，测量点数至少为 11 个点。

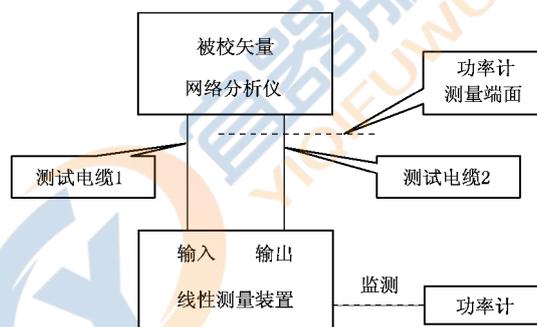


图 8 用线性测量装置校准模值动态准确度校准连接框图

7.8.2.2 调节被校矢量网络分析仪测试信号功率设置和线性测量装置中的步进衰减器设置，使功率计读数为 7.7.1.5 中的  $P_{2r}$ 。

7.8.2.3 将功率计连接到线性测量装置的监测端，断开线性测量装置与测试电缆的连接，在测试电缆两端用校准件对被校矢量网络分析仪进行带隔离校准的完全两端口自校准。

7.8.2.4 将线性测量装置的输入端和输出端分别连接到测试电缆 1 和测试电缆 2，设置被校矢量网络分析仪以线性形式显示  $S_{21}$ 。待单次扫描完成后对测量结果求算术平均值  $M'_r$ ，监测端功率计读数记为  $P'_r$ 。然后以 1 dB 或根据仪器技术指标要求增加或减少步进衰减器的衰减值，并读取步进衰减器第  $i$  次步进后的衰减值  $A'_i$ ， $S_{21}$  模值算术平均值  $M'_i$  和监测端功率计读数  $P'_i$ 。端口 2 入射功率记为  $P'_{2i}$  按公式 (9) 计算：

$$P'_{2i} = P_{2r} + (P'_i - P'_r) \quad (9)$$

式中：

$P'_{2i}$ ——步进衰减器第  $i$  次步进时，测试端口 2 的入射功率，dBm；

$P'_i$  ——步进衰减器第  $i$  次步进时, 监测端功率计读数, dBm;

$P'_r$  ——测量端面功率计读数为  $P_{2r}$  时, 监测端功率计读数, dBm。

端口 2 在功率为  $P'_{2i}$  时相对于功率为  $P_{2r}$  时的模值动态准确度  $DA'_{2ir}$  (dB) 按公式 (10) 计算:

$$DA'_{2i} = 20 \times \lg(M'_i) + A'_i \quad (10)$$

式中:

$DA'_{2i}$  ——步进衰减器第  $i$  次步进时, 模值准确度, dB;

$M'_i$  ——步进衰减器第  $i$  次步进时,  $S_{21}$  模值算术平均值;

$A'_i$  ——步进衰减器第  $i$  次步进时, 步进衰减器衰减值, dB。

7.8.2.5 根据以上步骤重复测量模值动态准确度, 重复次数应在 3 次以上, 取重复测量值的中位数作为模值动态准确度最终测量值, 校准记录格式参见附录 A 表 7。

7.8.2.6 同理可以测量得到测试端口 1 或其他测试端口的模值动态准确度。

## 7.9 校准件特性

7.9.1 校准件特性校准的连接如图 9 所示, 根据被校校准件的端口形式在矢量网络分析仪的一个测试端口连接相应的精密转接头。

7.9.2 将矢量网络分析仪的测试信号设置在逐点扫描输出状态, 按被校校准件的技术指标或实际测量要求设置测试信号频率和功率。接收机中频带宽根据仪器技术指标设置为 100 Hz 或 100 Hz 以下。

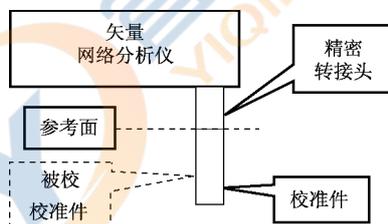


图 9 校准件特性校准连接框图

7.9.3 用校准件在精密转接头端面对矢量网络分析仪进行单端口自校准。然后在自校准参考面连接被校校准件, 测得被校校准件的反射系数模值和相角。

7.9.4 重复 7.8.3, 重复次数应在 3 次以上, 取多次自校准的测量值的中位数作为最终校准值, 校准记录格式参见附录 A 表 8。

注: 本校准项目中的矢量网络分析仪和校准件是表 1 中的校准用设备, 而不是被校矢量网络分析仪和被校校准件。

## 7.10 散射参数测量准确度

### 7.10.1 反射系数测量准确度

7.10.1.1 根据被校矢量网络分析仪的端口形式, 选取一个测试端口连接相应的精密转接头, 如图 10 所示。

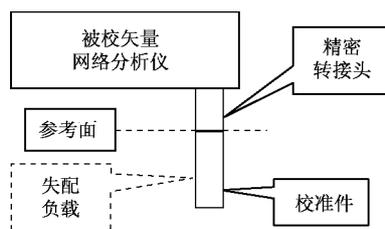


图 10 反射系数测量准确度校准连接框图

7.10.1.2 将被校矢量网络分析仪的测试信号设置在逐点扫描输出状态，按被校矢量网络分析仪的技术指标或实际测量要求设置测试信号频率和功率。接收机中频带宽根据仪器技术指标设置为 100 Hz 或 100 Hz 以下。

7.10.1.3 用校准件在精密转接头端面对被校矢量网络分析仪进行单端口自校准。然后在自校准参考面连接失配负载，测得失配负载的反射系数模值和相角。

7.10.1.4 重复 7.9.1.3，重复次数应在 3 次以上，取多次自校准对应的测量值的中位数作为最终测量值，最终测量值与失配负载标准值的差值为最终校准值，校准记录格式参见附录 A 表 9。

#### 7.10.2 两端口散射参数测量准确度

7.10.2.1 在被校矢量网络分析仪的一个测试端口连接柔性测试电缆，另一个测试端口连接相应精密转接头，如图 11 所示。

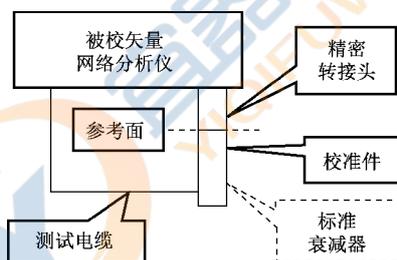


图 11 两端口散射参数测量准确度校准连接框图

7.10.2.2 将被校矢量网络分析仪的测试信号设置在逐点扫描输出状态，按被校矢量网络分析仪的技术指标或实际测量要求设置测试信号频率，根据仪器技术指标设置功率。接收机中频带宽根据仪器技术指标设置为 100 Hz 或 100 Hz 以下。

7.10.2.3 用校准件在精密转接头端面对被校矢量网络分析仪进行完全两端口自校准。自校准后在自校准参考面间连接衰减器，测得衰减器的 4 个散射系数模值以及  $S_{21}$  和  $S_{12}$  各自的相角。

7.10.2.4 重复 7.9.2.3，重复次数应在 3 次以上，取多次自校准对应的测量值的中位数作为最终测量值，最终测量值与衰减器标准值的差值为最终校准值，校准记录格式参见附录 A 表 9。

注：

- 1 本校准项目中的校准件、失配负载和衰减器是表 1 中的校准用设备；
- 2 其中失配负载和衰减器也可以用失配空气线、衰减器和标准空气线等检验件来代替；
- 3 对单端口被校矢量网络分析仪进行反射系数测量准确度校准，对 1 口以上被校矢量网络分析仪需对每个测试端口进行反射系数测量准确度校准，对每两个测试端口进行两端口散射参数

测量准确度校准。

## 8 校准结果的表达

被校矢量网络分析仪的校准结果用校准证书表达，对校准证书内容的要求参见 JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》。校准记录格式参见附录 A，校准证书内页格式参见附录 B，校准不确定度的评定方法参见附录 C。

## 9 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸因素所决定的，因此，送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔，建议为 1 年。



## 附录 A

## 校准记录格式

被校矢量网络分析仪外观检查

正常  不正常 

被校矢量网络分析仪工作正常性检查

正常  不正常 

被校校准件检查

正常  不正常 

表 1.1 被校网络分析仪同轴型式测试端口插针深度

被测端口	量规示值			
	1	2	...	
1				
2				

表 1.2 被校同轴型式校准件插针深度

被测件	量规示值			
	1	2	...	
开路器				
短路器				
固定负载				

表 2 内部信号源频率

标称频率 GHz	频率计示值			
	1	2	...	

表 3 内部信号源功率的校准

信号频率 GHz	标称功率 dBm	功率计示值 dBm			
		1	2	...	

表 4 扫迹噪声

测量点数 \_\_\_\_\_

中频带宽 \_\_\_\_\_

重复次数 \_\_\_\_\_

模值扫迹噪声

信号频率 GHz	第一次测量		第二次测量		第三次测量		第四次测量	
	stdevM	avgM	stdevM	avgM	stdevM	avgM	stdevM	avgM

相位扫迹噪声

信号频率 GHz	第一次测量	第二次测量	第三次测量	第四次测量
	stdevP (°)	stdevP (°)	stdevP (°)	stdevP (°)

表 5 本底噪声

测试端口本底噪声

测量点数\_\_\_\_\_

重复次数\_\_\_\_\_

中频带宽\_\_\_\_\_

信号频率 GHz	第一次测量		第二次测量		第三次测量		第四次测量	
	功率计 读数 $P_s$ dBm	测量结果 标准差 stdevN						

表 6 串扰

端口 1 到端口 2 的串扰

测量点数\_\_\_\_\_

测试信号功率设置\_\_\_\_\_

扫描平均次数\_\_\_\_\_

重复次数\_\_\_\_\_

信号频率 GHz	第一次测量			第二次测量			第三次测量			第四次测量		
	$P_1$ dBm	$P_1'$ dBm	$M_A$									

表 7 模值动态准确度

用步进衰减器校准模值动态准确度

信号频率\_\_\_\_\_

测量点数\_\_\_\_\_

自校准时测试信号功率设置\_\_\_\_\_

测量动态准确度时测试信号功率设置\_\_\_\_\_

中频带宽\_\_\_\_\_

扫描平均次数\_\_\_\_\_

重复次数\_\_\_\_\_

参考功率值\_\_\_\_\_

步进衰减器 设置位置	第一次测量		第二次测量		第三次测量		第四次测量	
	步进衰减器 设置值 dB	$S_{21}$ 读数 $M$						
参考位置								
0 位置								
1 位置								

用线性测量装置校准模值动态准确度

信号频率\_\_\_\_\_

测量点数\_\_\_\_\_

步骤 7.7.2.2 中的测试信号功率设置值\_\_\_\_\_

步骤 7.7.2.2 中步进衰减器设置值\_\_\_\_\_

中频带宽\_\_\_\_\_

扫描平均次数\_\_\_\_\_

重复次数\_\_\_\_\_

参考功率值\_\_\_\_\_

步进衰减器 设置位置	第一次测量		第二次测量		第三次测量		第四次测量	
	功率计 读数 $P_m$ dBm	$S_{21}$ 读数 $M'$						
参考位置								
0 位置								

表 7 (续)

步进衰减器 设置位置	第一次测量		第二次测量		第三次测量		第四次测量	
	功率计 读数 $P_m$ dBm	$S_{21}$ 读数 $M'$						
1 位置								

表 8 校准件特性校准

开路器反射系数模值

信号频率 GHz	仪器示值				
	1	2	...	$n$	中位数

开路器反射系数相角

信号频率 GHz	仪器示值				
	1	2	...	$n$	中位数

短路器反射系数模值

信号频率 GHz	仪器示值				
	1	2	...	$n$	中位数

短路器反射系数相角

信号频率 GHz	仪器示值				
	1	2	...	$n$	中位数

表 8 (续)

负载反射系数模值

信号频率 GHz	仪器示值				
	1	2	...	$n$	中位数

负载反射系数相角

信号频率 GHz	仪器示值				
	1	2	...	$n$	中位数

表 9 散射参数准确度校准

失配负载反射系数模值

信号频率 GHz	仪器示值				
	1	2	...	$n$	中位数

失配负载反射系数相角

信号频率 GHz	仪器示值				
	1	2	...	$n$	中位数

衰减器两端口散射参数  $S_{ij}$  模值

信号频率 GHz	仪器示值				
	1	2	...	$n$	中位数

衰减器两端口散射参数  $S_{21}$  相角

信号频率 GHz	仪器示值				
	1	2	...	$n$	中位数

表 9 (续)

衰减器两端口散射参数  $S_{12}$  相角

信号频率 GHz	仪器示值				
	1	2	...	$n$	中位数



## 附录 B

## 校准证书内页格式

表 1 内部信号源频率

标称频率 GHz	频率计示值平均值 MHz	与标称频率误差 Hz	不确定度 Hz

表 2 内部信号源功率的校准

信号频率 GHz	标称功率 dBm	功率计示值平均值 dBm	与标称功率误差 dB	不确定度 dB

表 3 扫迹噪声

模值扫迹噪声

信号频率 GHz	校准结果 dB	不确定度 dB

相位扫迹噪声

信号频率 GHz	校准结果 (°)	不确定度 (°)

表 4 本底噪声

本底噪声校准

信号频率 GHz	校准结果 dBm	不确定度 dB

表 5 串扰

端口 1 到端口 2 的串扰

信号频率 GHz	校准结果 dB	不确定度 dB

端口 2 到端口 1 的串扰

信号频率 GHz	校准结果 dB	不确定度 dB

表 6 模值动态准确度

信号频率

输入信号功率值 dBm	模值动态准确度 dB	不确定度 dB

表 7 校准件特性校准

反射系数模值

信号频率 GHz	校准结果	不确定度

反射系数相角

信号频率 GHz	校准结果 (°)	不确定度 (°)

表 8 散射参数准确度校准

失配负载反射系数模值

信号频率 GHz	标准值	校准结果	不确定度

表 8 (续)

失配负载反射系数相角

信号频率 GHz	标准值 (°)	校准结果 (°)	不确定度 (°)

20 dB 衰减器两端口散射参数  $S_{11}$  模值

信号频率 GHz	标准值	校准结果	不确定度

20 dB 衰减器两端口散射参数  $S_{21}$  模值

信号频率 GHz	标准值 dB	校准结果 dB	不确定度 dB

20 dB 衰减器两端口散射参数  $S_{21}$  相角

信号频率 GHz	标准值 (°)	校准结果 (°)	不确定度 (°)

20 dB 衰减器两端口散射参数  $S_{12}$  模值

信号频率 GHz	标准值 dB	校准结果 dB	不确定度 dB

20 dB 衰减器两端口散射参数  $S_{12}$  相角

信号频率 GHz	标准值	校准结果	不确定度

表 8 (续)

20 dB 衰减器两端口散射参数  $S_{22}$  模值

信号频率 GHz	标准值	校准结果	不确定度



## 附录 C

## 主要项目测量不确定度评定

## C.1 扫迹噪声的测量不确定度分析及评定

## C.1.1 测量方法

对扫迹噪声的测量是利用被校矢量网络分析仪的统计功能测得被测仪器的模值和相位重复测量结果的实验标准差  $s_{NM}$  和  $s_{NP}$ ，作为扫迹噪声。

## C.1.2 测量模型

线性模值扫迹噪声

$$s_{NM} = \text{stdev}M$$

相角扫迹噪声

$$s_{NP} = \text{stdev}P$$

## C.1.3 不确定度来源

由于测量过程中测试信号功率基本不变，因此不用考虑网络分析仪动态准确度等因素的影响。不确定度来源就是测量结果的实验标准差的标准差。

## C.1.4 相对标准不确定度评定

根据 JJF 1059.1—2012，对重复测量次数  $N$  在 50 次以上的实验标准差  $s_N$  的相对标准偏差 RSD 计算公式如下：

$$\text{RSD} = \frac{\sigma(s_N)}{s_N} = \frac{1}{\sqrt{2(N-1)}} \quad (\text{C.1})$$

假设  $N=51$ ，则  $\text{RSD}=0.1$ 。

取多次测量结果的中位数，中位数的分散性用四分位数间距表示，假设测量次数  $N$  为 4 次，自由度为 3。

## C.1.5 扩展不确定度评定

由  $\nu=50$ ，在  $p=95\%$  情况下，查  $t$  分布临界值，得  $t_{0.95}=3.18$ 。

根据正文中的公式 (3)，模值扫迹噪声校准结果的扩展测量不确定度  $U_{TNM}$  (dB) ( $p=95\%$ ) 可表示为：

$$U_{TNM} = 20 \times \lg \left( 1 + \frac{2.01}{\sqrt{2(N-1)}} \times \text{stdev}M / \text{avg}M \right)$$

假设实验测得  $\text{stdev}M / \text{avg}M$  为  $4.61 \times 10^{-4}$ ，则  $U_{TNM} = 1.27 \times 10^{-3}$  dB。

相位扫迹噪声校准结果的扩展测量不确定度  $U_{TNP}$  ( $p=95\%$ ) 可表示为：

$$U_{TNP} = \frac{2.01}{\sqrt{2(N-1)}} \text{stdev}P$$

假设  $\text{stdev}P$  为  $(3.8 \times 10^{-2})^\circ$ ，则  $U_{TNP} = (12.1 \times 10^{-3})^\circ$ 。

## C.2 本底噪声的测量不确定度分析及评定

## C.2.1 测量方法

对本底噪声的测量是利用被校矢量网络分析仪的传输系数测量和统计功能，功率计

的绝对功率测量功能，测得被测仪器在测试端口没有输入测试信号时的噪声背景，并将重复测量 3 次以上读数的中位数作为校准结果。

### C.2.2 测量模型

根据网络分析仪的工作原理和窄带噪声理论，测量结果  $\text{stdev}N$  可表示为下式：

$$(\text{stdev}N)^2 \approx \frac{\sigma^2}{P_S} = \frac{P_N}{P_S}$$

其中  $\sigma^2$  是噪声  $n(t)$  的方差，也是本底噪声功率  $P_N$ ，本底噪声测量模型可用下式表示：

$$P_N = (\text{stdev}N)^2 P_S$$

### C.2.3 测量不确定度来源

测量不确定度来源主要包括：功率计功率测量不准带来的不确定度， $u_r(M_S)$  为  $\text{stdev}N$  测量不准带来的相对标准测量不确定度，重复测量带来的不确定度。

### C.2.4 相对标准不确定度评定

a) 功率计功率测量不准带来的相对标准测量不确定度  $u_r(P_S)$

参照脉冲功率计国家检定规程进行评定，假设给出的扩展不确定度为 3.0%，服从正态分布，自由度为 50。则  $u_r(P_S) = 1.5\%$ 。

b)  $\text{stdev}N$  测量不准带来的相对标准测量不确定度  $u_r(M_S)$

因为同是统计量的不确定度，根据公式 (C.1) 计算，假设  $N = 51$ ， $u_r(M_S) = 0.10$ ，正态分布，自由度为 50。

c) 重复测量带来的相对标准测量不确定度  $u_{rA}(P_N)$

取多次测量结果的中位数，中位数的分散性用标准四分位数间距表示，假设测量次数  $N$  为 5 次，自由度为 4。

### C.2.5 合成相对标准不确定度

表 C.1 标准不确定度分量一览表

不确定度分量	来源	评定方法	分布	$k$ 值	相对标准不确定度 (线性)	自由度
$u_r(P_S)$	功率 $P_S$ 测量不准	B 类	正态	2	0.015	50
$u_r(M_S)$	$M_S$ 测量不准	B 类	正态	2	0.10	50
$u_{rA}(P_N)$	测量 $P_N$ 重复性	A 类			0.10	4

以上各项标准不确定度分量是互不相关的，所以合成相对标准不确定度为：

$$u_r(P_N) = \sqrt{u_r^2(P_S) + u_r^2(M_S) + u_{rA}^2(P_N)} = 0.142$$

### C.2.6 扩展不确定度评定

由  $\nu_{\text{eff}} = 15$ ，在  $p = 95\%$  情况下，查  $t$  分布临界值，得  $t_{0.95} = 2.13$ ，因此，本底噪声校准结果的扩展不确定度  $U_{rP_N} = 0.30$  ( $t_{0.95} = 2.13$ )。

对数形式本底噪声校准结果的扩展不确定度可表示为：

$$U_{P_N} = 20 \times \lg(1 + U_{rP_N})$$

由以上数据，得  $U_{P_N} = 2.3$  dB。

### C.3 串扰的测量不确定度分析及评定

#### C.3.1 测量方法

对串扰的测量是利用被校矢量网络分析仪的接收机比值测量和统计功能测得被测仪器在测试端口间的串扰，并将重复测量 3 次以上读数的中位数作为校准结果。

#### C.3.2 测量模型

基于与本底噪声测量类似的原理，在忽略了动态准确度等的影响后，校准步骤 7.7.5 中  $S_{21}$  测量结果可表示为下式：

$$S_{21} \approx \frac{n(t) + S(t) \times C}{S'(t)} \times \frac{1 + DA_N}{1 + DA_S} \quad (\text{C.2})$$

式中：

$n(t)$  —— 窄带噪声信号；

$S(t)$  —— 校准步骤 7.7.5 测试端口 1 的输出测试信号；

$S'(t)$  —— 校准步骤 7.7.5 输入测试端口 2 的测试信号；

$C$  —— 步骤 7.7.5 中测试端口 1 到测试端口 2 的串扰；

$DA_N$  —— 步骤 7.7.5 测量时的动态准确度；

$DA_S$  —— 步骤 7.7.4 测量时的动态准确度。

根据理论分析和实验验证， $n(t)$  为零均值的窄带白噪声，由公式 (C.2) 有串扰的基本测量模型如下：

$$C_i = M_A \left| \frac{1 + DA_S}{1 + DA_N} \right| \left| \frac{S'(t)}{S(t)} \right| \approx M_A \sqrt{\frac{P'_1}{P_1}}$$

#### C.3.3 测量不确定度来源

测量不确定度来源主要包括：分别为  $M_A$  测量不准带来的不确定度，功率  $P_1$  和  $P'_1$  测量不准带来的不确定度， $C_i$  重复测量带来的不确定度。

#### C.3.4 相对标准不确定度评定

##### a) $M_A$ 测量不准带来的相对标准不确定度 $u_r(M_A)$

实际上是直通校准和测量串扰时测量端口 2 的相对动态准确度，主要受网络分析仪增益压缩的影响，假设服从正态分布， $u_r(M_A) = 0.01$ ，自由度为 50。

##### b) 功率 $P_1$ 和 $P'_1$ 测量不准带来的相对标准测量不确定度 $u_r(P_1)$ 和 $u_r(P'_1)$

参照脉冲功率计国家检定规程进行评定，假设给出的扩展不确定度为 3.0%，服从正态分布，自由度为 50。则  $u_r(P_S) = 1.5\%$ 。

##### c) 重复测量 $C_i$ 带来的相对标准测量不确定度 $u_{rA}(C_i)$

由于是取多次测量结果的中位数，中位数的分散性用标准四分位数间距表示，假设测量次数  $N$  为 5 次，自由度为 4。

#### C.3.5 合成相对标准不确定度

标准不确定度分量见表 C.2。

表 C.2 标准不确定度分量一览表

不确定度分量	来源	评定方法	分布	$k$ 值	相对标准不确定度	自由度
$u_r(M_A)$	$M_A$ 测量不准	B类	正态	2	0.01	50
$u_r(P_1)$	功率 $P_1$ 测量不准	B类	正态	2	0.015	50
$u_r(P_1')$	功率 $P_1'$ 测量不准	B类	正态	2	0.015	50
$u_{rA}(C_t)$	测量 $C_t$ 重复性	A类			0.05	4

以上各项标准不确定度分量是互不相关的，所以合成标准不确定度为：

$$u_r(C_t) = \sqrt{u_r^2(M_A) + u_r^2(P_1) + u_r^2(P_1') + u_{rA}^2(C_t)} = 0.055$$

### C.3.6 扩展不确定度评定

由  $\nu_{\text{eff}}=7$ ，在  $p=95\%$  情况下，查  $t$  分布临界值，得  $t_{0.95}=2.36$ ，因此，串扰校准结果的扩展不确定度  $U_{rC_t}=0.13$  ( $t_{0.95}=2.36$ )。

对数形式本底噪声校准结果的扩展不确定度可表示为：

$$U_{P_N} = 20 \times \lg(1 + U_{rC_t})$$

由以上数据，得  $U_{C_t}=1.1$  dB。

### C.4 模值动态准确度的测量不确定度分析及评定

根据图 C.1，在忽略接头、电缆、串扰和噪声的影响后，模值动态准确度可表示为：

$$(1 + LDA_2) = \frac{1}{|(1 + \tau_2)|} \left| \frac{b_{2m}}{b_2} \right|$$

式中：

$b_2$  —— 测试端口 2 的入射波；

$b_{2m}$  —— 网络分析仪自校准后对  $b_2$  的测量值；

$LDA_2$  —— 模值动态准确度的线性值；

$\tau_2$  —— 传输扫迹。

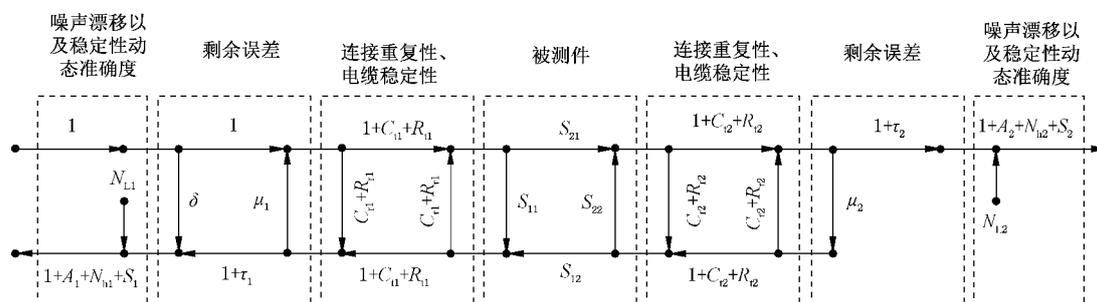


图 C.1 网络分析仪自校准后前向剩余误差的信号流图

#### C.4.1 使用步进衰减器校准模值动态准确度

##### C.4.1.1 测量方法

使用步进衰减器校准模值动态准确度，是通过求步进衰减器的标准值与网络分析仪

测量值的差异来求得动态准确度。

#### C.4.1.2 数学模型

根据图 C.1, 在忽略接头、电缆和噪声的影响后,  $M_r$  可表示为:

$$M_r = |S_{21A}^r| \frac{|(1 + \tau_2)|(1 + LDA_{2r})}{|(1 - \mu_1 S_{11A}^r)(1 - \mu_2 S_{22A}^r) - \mu_1 \mu_2 S_{21A}^r S_{12A}^r|} \quad (C.3)$$

式中各参数均取线性值, 其中  $S_{11A}^r$ ,  $S_{12A}^r$ ,  $S_{21A}^r$ ,  $S_{22A}^r$  是步进衰减器衰减量为  $A_r$  时对应的散射参数,  $LDA_{2r}$  是功率为  $P_{2r}$  时端口 2 的参考模值动态准确度的线性值,  $\tau_2$  为传输扫迹,  $\mu_1$  为端口 1 源匹配,  $\mu_2$  为端口 2 负载匹配。公式 (C.2) 中的分母对应系统剩余失配对测量结果的影响, 用 RM 代表, 则端口 2 在功率为  $P_{2r}$  时的参考模值动态准确度可写为:

$$(1 + LDA_{2r}) = \frac{M_r}{|S_{21A}^r|} \frac{RM_r}{|(1 + \tau_2)|} \approx \frac{M_r}{|S_{21A}^r|}$$

其中的  $RM_r$  代表剩余失配在参考状态下对测量结果的影响。上式写成对数形式即为:

$$DA_{2r} = 20 \lg(M_r) + A_r + 20 \lg(RM_r) - \tau_2$$

类似的, 端口 2 在功率为  $P_{2i}$  时的模值动态准确度可写为:

$$DA_{2i} = 20 \lg(M_i) + A_i + 20 \lg(RM_i) - \tau_2$$

其中  $RM_i$  代表剩余失配在步进衰减器第  $i$  次步进状态下对测量结果的影响。

#### C.4.1.3 不确定度来源

测量不确定度来源主要包括: 网络分析仪的噪声对  $S_{21}$  模值测量带来的不确定度, 衰减器的衰减值不准带来的不确定度, 自校准后剩余传输扫迹带来的标准不确定度, 自校准后系统剩余失配带来的不确定度,  $DA_{2r}$  测量重复性对应的不确定度,  $M_A$  测量不准带来的不确定度, 功率  $P_1$  和  $P_1'$  测量不准带来的不确定度, 功率计测量得到的测试端口入射功率不准带来的不确定度。

#### C.4.1.4 相对标准不确定度评定

a) 网络分析仪的噪声对  $S_{21}$  模值测量带来的不确定度  $u(M_r)$

由于此时测试端口 2 输入功率约为  $-20$  dBm, 中频带宽为 10 Hz, 经过 100 次以上的扫描平均和 11 次以上的测量点数平均后实际中频带宽小于 1 Hz, 因此  $u(M_r)$  可忽略。

b) 衰减器的衰减值不准带来的标准测量不确定度  $u(A_r)$

衰减值不准带来的标准测量不确定度  $u(A_r)$  由其扩展不确定度得到, 假设  $U(A_r) = 0.014$  dB, 服从正态分布,  $k=2$ , 则  $u(A_r) = 0.007$  dB, 自由度为  $\infty$ 。

c) 自校准后剩余传输扫迹带来的标准测量不确定度  $u(\tau_2)$

假设自校准后剩余传输扫迹为 0.008 dB, 服从正态分布,  $k=2$ , 则  $u(\tau_2) = 0.004$  dB, 自由度为  $\infty$ 。

d) 自校准后剩余失配带来的标准测量不确定度  $u(RM_r)$

可根据公式 (C.3) 进行评定, 假设自校准后源匹配和负载匹配均为 0.01, 步进衰减器在参考状态  $S_{11A}^r$  和  $S_{22A}^r$  均小于 0.1,  $S_{12A}^r$  和  $S_{21A}^r$  均小于 0.1, 则  $RM_r$  小于 1.002,

取  $RM_r=1.002$ ，则  $RM_r(\text{dB})=0.0174\text{ dB}$ ，服从均匀分布， $u(RM_r)=0.010\text{ dB}$ ，自由度为 $\infty$ 。

e) 重复测量  $DA_{2r}$ 带来的标准测量不确定度  $u(DA_{2r})$

按 A 类评定，用贝塞尔公式计算重复测量的单次标准差，假设重复测量次数为 5 次，自由度为 4， $u_A(DA_{2r})=0.010\text{ dB}$ 。

f) 功率计测量得到的测试端口入射功率不准带来的不确定度

由测得的模值动态准确度曲线估算：在入射功率变化 10 dB 的情况下模值动态准确度变化了 0.05 dB，而功率计测量不确定度优于 0.2 dB，因此该项不确定度小于 0.001 dB，可以忽略不计。

同理可以同样评定除模值动态准确度  $DA_{2i}$ 的标准不确定度。

标准不确定度分量见表 C.3。

表 C.3 标准不确定度分量一览表

不确定度分量	来源	评定方法	分布	$k$ 值	标准不确定	自由度
$u(A_r)$	衰减值不准	B 类	正态	2	0.007 dB	$\infty$
$u(\tau_2)$	剩余传输扫迹	B 类	正态	2	0.004 dB	$\infty$
$u(RM_r)$	系统剩余失配	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.010 dB	$\infty$
$u_A(DA_{2r})$	测量 $DA_{2r}$ 重复性	A 类			0.010 dB	4

#### C.4.1.5 合成标准不确定度

各不确定度分量不相关，则合成相对标准不确定度：

$$u(DA_{2r}) = \sqrt{u^2(A_r) + u^2(\tau_2) + u^2(RM_r) + u_A^2(DA_{2r})} \quad (\text{C.4})$$

按公式 (C.4) 计算得  $u(DA_{2r})=0.016\text{ dB}$ ，根据有效自由度合成公式， $\nu_{\text{eff}}=28$ 。

类似的，可以同样评定除模值动态准确度  $DA_{2i}$ 的合成标准不确定度。

#### C.4.1.6 扩展不确定度

由  $\nu_{\text{eff}}=28$ ，在  $p=95\%$  情况下，查  $t$  分布临界值，得  $t_{0.95}=2.06$ ，因此，参考模值动态准确度的扩展测量不确定度：

$$U(DA_{2r})=0.033\text{ dB}(t_{0.95}=2.06)$$

同理可以同样评定除模值动态准确度  $DA_{2i}$ 的扩展不确定度。

### C.4.2 用线性测量装置校准模值动态准确度

#### C.4.2.1 测量方法

用线性测量装置校准模值动态准确度，是用标准功率计相对读数与网络分析仪测量值的差异来求得动态准确度。

#### C.4.2.2 数学模型

端口 2 在功率为  $P_{2i}'$  时相对于功率为  $P_{2r}$  时的模值动态准确度  $DA_{2ir}'$  可写为：

$$\frac{(1 + LDA_{2i}')}{(1 + LDA_{2r})} = \frac{M_i'}{M_r'} \frac{|S_{21}^{i'}|}{|S_{21}^r|} \frac{RM_i'}{RM_r'}$$

其中的  $RM_i'$  和  $RM_r'$  代表剩余失配在线性测量装置的第  $i$  次步进状态和参考状态下

对测量结果的影响,  $S_{21}^{i'}$  和  $S_{21}^{i'}$  分别是线性测量装置在参考状态和第  $i$  次步进状态时的输入到输出的传输系数。根据传输系数的定义上式可以改写为:

$$\frac{(1 + LDA'_{2i})}{(1 + LDA_{2r})} = \frac{M'_i}{M'_r} \left| \frac{b_{2r}/a_{1r}}{b_{2i}/a_{1i}} \right| \frac{RM'_i}{RM'_r} = \frac{M'_i}{M'_r} \left| \frac{b_{2r}}{b_{2i}} \right| \frac{RM'_i}{RM'_r} \approx \frac{M'_i}{M'_r} \sqrt{\frac{P_{mr}}{P_{mi}}} \frac{RM'_i}{RM'_r}$$

写成对数形式即为,

$$DA'_{2i} = DA_{2r} + 20 \lg(M'_i/M'_r) - (P_{mi} - P_{mr}) + 20 \lg(RM'_i/RM'_r)$$

#### C. 4. 2. 3 不确定度来源

用线性测量装置校准模值动态准确度,  $DA_{2r}$  测量不确定度的分析参见 C. 4. 1,  $DA'_{2i}$  测量不确定度来源主要包括: 两次功率计读数差值 ( $P_{mi} - P_{mr}$ ) 的不确定度, 两次测量状态下的剩余失配带来的测量不确定度,  $DA'_{2i}$  测量重复性对应的不确定度  $u_A(DA'_{2i})$ ,  $DA_{2r}$  测量不确定度。

#### C. 4. 2. 4 相对标准不确定度评定

a) 两次功率计读数差值 ( $P_{mi} - P_{mr}$ ) 的不确定度  $u(P_{mi} - P_{mr})$

因为失配和频率等条件均不变, 其不确定度由功率计的线性度决定, 根据技术指标, 功率计在测量范围内线性度优于 0. 02 dB, 设  $u(P_{mi} - P_{mr}) = 0. 010$  dB, 服从正态分布, 自由度为  $\infty$ 。

b) 两次测量状态下的剩余失配带来的测量不确定度  $u(RM'_i/RM'_r)$

两次测量状态下的剩余失配带来的测量不确定度, 可根据公式 (C. 3) 进行评定, 假设自校准后源匹配和负载匹配均为 0. 01, 线性测量装置在两次测量状态的端口反射均小于 0. 1, 由于放大器的反向隔离一般大于 50 dB, 传输系数的影响可以忽略, 且可以通过合理设置使两次状态的端口反射基本不变, 则  $RM'_i/RM'_r$  小于 1. 002, 取其为 1. 002, 则  $u(RM'_i/RM'_r) = 0. 010$  dB, 服从均匀分布, 自由度为  $\infty$ 。

c) 重复测量  $DA'_{2i}$  带来的标准测量不确定度  $u(DA'_{2i})$

按 A 类评定, 用贝塞尔公式计算重复测量的单次标准差, 假设重复测量次数为 5 次, 自由度为 4,  $u_A(DA'_{2i}) = 0. 010$  dB。

d)  $DA_{2r}$  测量不确定度  $u(DA_{2r})$

根据 C1 评定结果,  $u(DA_{2r}) = 0. 016$  dB, 有效自由度  $\nu_{\text{eff}} = 28$ 。

标准不确定度分量见表 C. 4。

表 C. 4 标准不确定度分量一览表

不确定度分量	来源	评定方法	分布	$k$ 值	标准不确定度	自由度
$u(P_{mi} - P_{mr})$	两次功率计读数差值	B 类	正态	2	0. 01 dB	$\infty$
$u(RM'_i/RM'_r)$	两次测量状态的剩余失配	B 类	正态	2	0. 01 dB	$\infty$
$u(DA'_{2i})$	测量 $DA'_{2i}$ 重复性	A 类			0. 010 dB	4
$u(DA_{2r})$	参考模值动态准确度	B 类			0. 010 dB	28

#### C. 4. 2. 5 合成标准不确定度

各不确定度分量不相关, 则合成相对标准不确定度:

$$u(DA'_{2i}) = \sqrt{u^2(P_{mi} - P_{mr}) + u^2(RM'_i/RM'_r) + u_A^2(DA'_{2i}) + u^2(DA_{2r})} \quad (C.5)$$

按公式 (C.5) 计算得  $u(DA_{2r}) = 0.024$  dB, 根据有效自由度合成公式,  $\nu_{\text{eff}} = 63$ 。

#### C.4.2.6 扩展不确定度

由  $\nu_{\text{eff}} = 63$ , 在  $p = 95\%$  情况下, 查  $t$  分布临界值, 得  $t_{0.95} = 1.984$ , 因此, 用线性测量装置校准的模值动态准确度的扩展测量不确定度:

$$U(DA'_{2i}) = 0.048 \text{ dB} (t_{0.95} = 1.984)$$

### C.5 校准件特性校准的不确定度分析及评定

#### C.5.1 测量方法和测量模型

对校准件特性的校准是用经标准校准件自校准的矢量网络分析仪 (标准设备) 直接测量被校校准件, 并将重复校准 3 次以上的测量结果的中位数作为校准结果。

#### C.5.2 测量不确定度来源

测量不确定度来源主要包括: 网络分析仪自校准不完善引入的不确定度, 重复测量带来的不确定度。

#### C.5.3 标准不确定度评定

a) 网络分析仪自校准不完善引入的标准不确定度  $u(|\Gamma|)$

根据网络分析仪的技术说明书或校准证书, 得其测量开路器、短路器和固定负载反射系数的扩展不确定度, 服从正态分布,  $k=2$ , 自由度为  $\infty$ 。

b) 重复测量带来的不确定度  $u_A(|\Gamma|)$

由于是取多次测量结果的中位数, 中位数的分散性用标准四分位数间距表示, 假设测量次数  $N$  为 6 次, 自由度为 5。

#### C.5.4 标准不确定度评定

以上各项标准不确定度分量是互不相关的, 所以合成标准不确定度为:

$$u_{\text{kit}} = \sqrt{u^2(|\Gamma|) + u_A^2(|\Gamma|)} \quad (C.6)$$

假设被测是 3.5 mm 阳极性接头的开路器, 其反射系数模值  $|\Gamma_0|$  校准结果在 1 附近, 在 50 MHz, 18 GHz 和 26.5 GHz 的不确定度分量, 如表 C.5 所示。

表 C.5 3.5mm 阳接头的开路器反射系数模值校准结果不确定度分量一览表

频率	不确定度分量	来源	评定方法	分布	$k$ 值	标准不确定
50 MHz	$u( \Gamma )$	网络分析仪自校准不完善	B类	正态	2	0.002 1
	$u_A( \Gamma )$	测量重复性	A类			0.001 2
18 GHz	$u( \Gamma )$	网络分析仪自校准不完善	B类	正态	2	0.002 3
	$u_A( \Gamma )$	测量重复性	A类			0.002 1
26.5 GHz	$u( \Gamma )$	网络分析仪自校准不完善	B类	正态	2	0.002 9
	$u_A( \Gamma )$	测量重复性	A类			0.002 7

由公式 (C.6), 开路器反射系数模值校准结果的标准不确定度如表 C.6 所示。

表 C.6 3.5 mm 阳接头的开路器反射系数模值校准结果的标准不确定度

频率	标准不确定度	有效自由度
50 MHz	0.002 4	50
18 GHz	0.003 1	14
26.5 GHz	0.004 0	14

短路器的情况与开路器类似，这里不再举例。假设被测是 3.5 mm 阳极性接头的固定负载，其反射系数模值  $|\Gamma_L|$  校准结果小于 0.02，在 50 MHz，18 GHz 和 26.5 GHz 的不确定度分量，如表 C.7 所示。

表 C.7 3.5 mm 阳接头的固定负载反射系数校准结果不确定度分量一览表

频率	不确定度分量	来源	评定方法	分布	$k$ 值	标准不确定
50 MHz	$u( \Gamma )$	网络分析仪自校准不完善	B 类	正态	2	0.000 7
	$u_A( \Gamma )$	测量重复性	A 类			0.001 0
18 GHz	$u( \Gamma )$	网络分析仪自校准不完善	B 类	正态	2	0.000 9
	$u_A( \Gamma )$	测量重复性	A 类			0.001 8
26.5 GHz	$u( \Gamma )$	网络分析仪自校准不完善	B 类	正态	2	0.001 2
	$u_A( \Gamma )$	测量重复性	A 类			0.001 8

固定负载反射系数模值校准结果的标准不确定度如表 C.8 所示。

表 C.8 3.5 mm 阳接头的固定负载反射系数校准结果的标准不确定度

频率	标准不确定度	有效自由度
50 MHz	0.001 2	6
18 GHz	0.002 0	5
26.5 GHz	0.002 2	6

### C.5.5 扩展不确定度评定

根据表 C.6 和 C.8 可以计算得到开路器和固定负载反射系数模值校准结果的扩展不确定度及在  $p=95\%$  情况下的扩展因子，分别为表 C.9 和 C.10。

表 C.9 3.5 mm 阳接头的开路器反射系数模值校准结果扩展不确定度

频率	扩展不确定度	包含因子
50 MHz	0.004 8	2.01
18 GHz	0.006 6	2.14
26.5 GHz	0.008 6	2.14

表 C.10 3.5 mm 阳接头的固定负载反射系数模值校准结果扩展不确定度

频率	扩展不确定度	包含因子
50 MHz	0.002 9	2.45
18 GHz	0.005 1	2.57
26.5 GHz	0.005 4	2.45

